

油の劣化について思う

出口 幹 雄*



1. はじめに

筆者は、数年前からカヤバ社との共同研究で、油の劣化に伴う性状変化を、低コストの簡単な仕掛けで検知することができるセンサの開発に取り組んでいる。機械装置の中で油は、潤滑・冷却・電気絶縁・防錆などの目的で、また、油圧システムの作動油としてなど、あらゆるところで幅広く用いられている。しかし、身近なところでは、車のエンジンオイルが走行に伴い段々と黒ずんでくるように、装置の稼働に伴い、時間と共に油の性状は徐々に変化し、その変化は総じて好ましくない向きである故、これを“劣化”という。

油の劣化の主たるメカニズムは、酸化と汚染であると考えられる。劣化は、油の様々な物理パラメータの変化として現れる¹⁾⁻⁶⁾。酸化の程度は、全酸価を指標として評価されるが、我々は、これと比較的相関が高いと考えられる電氣的パラメータである“誘電率”に注目している。

物質の誘電率は、2つの電極間にその物質を満たし、電極間の静電容量（電気の蓄え易さを表すパラメータ）として評価される。静電容量を測定すること自体は、電気計測の基本的な技術であって、様々な手法が考えられるので、色々な切り口から、油の性状変化を検出するに適した方法を探索する余地がある。以下、これについての我々の取り組みについて簡単に紹介するとともに、油の“劣化”ということに発して、あれこれと思い巡らしてみたことについて綴ることにする。

2. 誘電率とは

物質の“誘電率”とは、平たくは、“電”気に“誘”われ易い割合、と説明することができる。物体が帯びている電気のことを“電荷”と呼ぶ。電荷には+と-があること、また、+同士、-同士は反発し、+と-は引き合う、ということはよく知られている

ことだろう。あらゆる物質は、構成元素の原子を基本単位として、その組み合わせでできている。原子は、+の電荷を帯びた原子核の周りを、-の電荷を持つ電子が取り囲むようにしてできている。つまり、物質の中には、+と-それぞれの電荷が無数に存在している。通常は、+と-は同量で、全体として+の重心と-の重心の位置にズレはなく、どちらに偏っているということもない状態にある。

ところが、2つの電極の間に物質を満たし、電極間に電圧を加えると、物質中の+の電荷は+側の電極から反発を受け、-側に電極に引っ張られる。-の電荷はこれと逆向きの力を受ける。その結果、物質中の+の重心と-の重心の位置にズレが生じる。これを“分極”といい、誘電率は、この分極の起きやすさを表すパラメータである。

分極が起きるメカニズムはいくつか考えられる。各原子の原子核を取り囲む電子雲が+側に引っ張られて変位することに拠る分極は、物質が原子から構成されている以上、あらゆる物質において生じる現象で、電子分極と呼ばれる。物質によっては、構成原子が+イオンと-イオンに分かれ、正負イオン間の引き合う力で結合しているものがある。このような場合、+イオンと-イオンにそれぞれ逆の向きに力が作用すると、イオン原子そのものが平衡位置からそれぞれ逆の向きに片寄り、+/-の重心がずれることになる。これはイオン分極または原子分極と呼ばれる。

また、物質を構成する分子が、それ自体でその中の+の重心と-の重心がズレているものがある。このように、元々+の極と-の極に分かれているものを“永久双極子”という。普段は、この永久双極子の向きはバラバラで、物質全体で見れば特に+/-の偏りは無いが、+/-の電荷に逆向きの力が加わると、双極子の向きが力と平行方向に揃えられるように作用が働き、その結果、全体としては極が分かれることになる。これを配向分極と呼ぶ。

実は、物質を構成する分子には、永久双極子になっ

*新居浜高専 電子制御工学科 教授

ているものの方がむしろ多い、と言ってもよいだろう。身近で代表的なものとして、水分子を挙げることができる。水分子は、水素原子 (H) 2つと酸素原子 (O) 1つからできている。水素は原子番号1で電子を1つしか持たない。酸素原子との結合の手としてこの電子が使われるので、水素の原子核 (陽子) の+電荷が顔を出して、水素原子側が+に、酸素原子側が-に偏ることになる。2つの水素原子と酸素原子は一直線に並んでおらず、104.5°の角度をなして結合しているの、+の重心と-重心が一致しないのである。このため、水の誘電率は、液体の中でも特異的に大きな値を示す。

3. 誘電率のわずかな変化を検出する

2つの電極間の静電容量は、電極間に満たされた絶縁物の誘電率に比例する。油の劣化による誘電率の変化は、劣化の程度にもよるが、せいぜい数%程度のわずかな変化 (増加) である。センサの寸法はあまり大きくすることはできないので、センサの電極の静電容量の大きさそのものも小さな値にしかならず、その小さな値のわずかな変化を検出する必要があるのである。静電容量の微小変化を検出する方法はいくつか考えられる。

一般論として、ある物理量を電子技術によって計測する場合、必ず最終的には、対象とする物理量の大きさを、電圧の大小または時間の長短に置き換えて計測することになる。したがって、問題は、静電容量の大きさを、如何にして電圧または時間に焼き直すかということに帰着する。

例えば、2つの電極間の電圧は、電極間に蓄えられた電荷量を電極間の静電容量で割った値になるので、一定量の電荷を電極間に蓄えた時の電圧を測定することで、静電容量の大きさを知ることができる。一定量の電荷を蓄えるには、一定の大きさの電流を一定時間供給すればよい。電流の大きさが既知の一定値であれば、一定時間流して充電した後の電圧を測るか、あるいは、ある電圧まで充電するのに要する時間を測るか、のどちらかの方法をとることができる。いずれにしても、この場合、静電容量の変化の割合と計測の指標値の変化率は同程度にしかならないので、僅かな変化を検出しようとする、避けることのできないノイズを如何にして抑えてS/N (信号対雑音比) を確保するか、ということが測定の性能を直接左右することになる。

これを解決するには、静電容量の僅かな変化が、別の物理量のもっと大きな変化に拡大して反映される仕掛けを用意すればよい。これを実現する一つの手段は、“共振”を利用することである。共振とは、

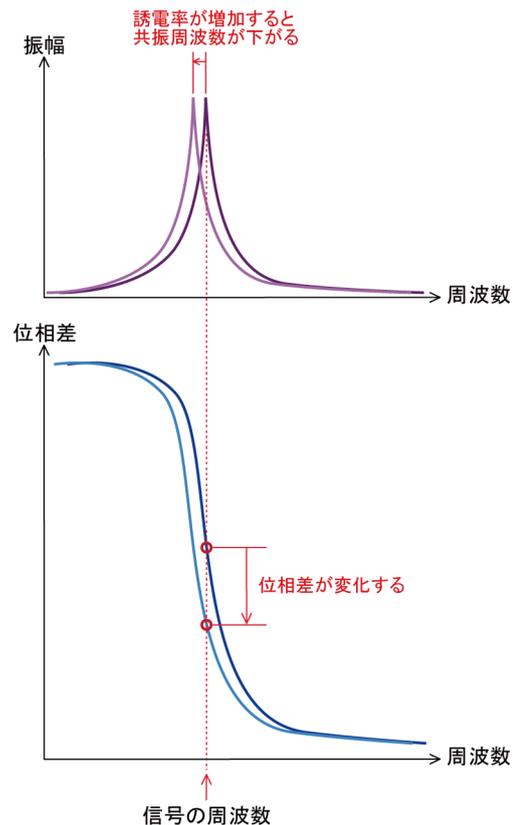


図1 静電容量の変化が位相差の変化に拡大されて観測される原理

系がある固有振動数 (共振周波数) を持つ時、それに近い周波数で励起すると、弱い励起でも大きな振幅の振動が起きる現象をいう。電気回路では、静電容量と双対をなすパラメータである“インダクタンス”との組み合わせで共振が起きる。通常、インダクタンスはコイルによって実装される。コイルは、なんらかの芯 (コア) の周りに導線をグルグル巻いたものである。一般に、静電容量は記号C、インダクタンスはLで表されるので、静電容量とインダクタンスとの間の共振を“LC共振”という。

共振が起きる時、それを励起する信号と、励起されて起きる振動の位相関係が共振周波数の前後で大きく変化する。位相とは、振動がどちら側に振れるかのタイミングを表す量である。したがって、横軸を周波数、縦軸を励起信号とそれによって起きた振動の位相の差としたグラフ (位相特性) を描くと、共振周波数のところでグラフは大きな傾きとなる。一方、静電容量が変化すると共振周波数が変化することになるが、励起信号の周波数を共振周波数近傍で一定に保持しておけば、グラフの傾きが急峻なため、わずかに共振周波数が変化しただけでも、位相差の変化としてはこれが拡大されて観測されることになる (図1)。

この方法で感度良く静電容量の変化を検出するた

めには、共振周波数における位相特性の傾きができるだけ大きいことが望ましい。ところが、インダクタンスを普通にコイルで実装した場合、コイルは、純粋にインダクタンスのみの成分を持つ訳ではなく、巻線の抵抗成分や巻線と巻線との間の静電容量成分も含んでおり、これが共振の鋭さを鈍くする。また、コイルに電流が流れることにより発生する磁界は、その性質上、周りに必ず広がることになって周辺との干渉が避けられないという問題も生じる。

これらの問題を解決するため、我々の取り組みでは、インダクタンスをコイルで実装するのではなく、これと等価な特性を電子回路で実現するようにした⁷⁾。といっても、特殊な電子素子を用いる訳ではなく、一般的な素子の組み合わせのみで構成できる。この回路はGIC (General Impedance Converter) と呼ばれる回路で、静電容量を実質的にインダクタンスに変換することができる。我々の開発しているセンサでは、センサ電極の静電容量とGICによる等価インダクタンスとの間のLC共振を起こさせ、これを利用して、油の性状変化による誘電率のごく僅かな変化を感度よく検出することができる。また、特殊な部材を必要とせず、一般的な材料で全てを構築可能であり、低コストで実現ができる、という優れた特徴を持っている。

4. 油の劣化について考える

では、どうして油が劣化すると誘電率が変化(増加)するのだろうか。劣化の主要因となる、油の物質としての変化は、油分子の酸化であるから、言い換えれば、油分子の酸化によって誘電率がどうして変化するのか、ということである。

油の分子は、基本的には炭素原子(C)と水素原子(H)の多数の組み合わせでできている。そして、水分子とは異なり、通常、分子自体は永久双極子となっておらず無極性である。これが水と油が交じり合わない理由の一つである。

ところが、酸化によって油分子に酸素原子が結合すると、酸素は周期律表で右上の方に位置する元素であるので、比較的電気陰性度が大きい。このため、酸素原子が結合した部分が $-$ に偏ることになる。その結果、油分子に極性が生じ、配向分極の要素が加わって、全体としては誘電率が増加することになる、と考えられる。

油にも実に様々な種類があるが、基本的に構成要素がCとHの2種類だけにも関わらず、そこから無数の種類の油が生まれるということは、考えてみれば不思議なことのようにも思える。ちなみに、コンピュータのプログラムも、0と1の2種類の要素の

組み合わせで全てできている訳であるから、そういう意味では似ている。もっと言えば、生物のDNA情報がアデニン(A)、グアニン(G)、チミン(T)、シトシン(C)の4つの塩基配列で決まることはよく知られているが、組み合わせとしてはA-TとG-Cの2種類で、やはりその2種類の配列パターンでDNAの情報が構成されている。つまり、世の中の全てのものは、限られた少数の種類の駒を材料として、あとは全てその組み合わせでそれぞれの違いが生まれている訳である。

コンピュータのプログラムの場合、0と1のそれぞれは、単独ではそれがそこにあるという情報しか持たないが、いくつかを組み合わさることによって、数値や命令としての意味を持つようになる。この時、組み合わせのパターンとそれが持つ意味の関係は固有のものでもなく、必然的なものでもない。例えば、言語の場合も、日本語は50音、英語はアルファベット26文字の組み合わせで表される。同じa(あ)とi(い)の組み合わせでも、「愛」を表すこともあれば、「I(私)」を表すこともできる。

ヒトのゲノム解析が進み、遺伝子診断の技術が進歩して、DNAを調べることで、将来罹りやすい病気なども分かるようになってきた。A-TとG-Cの配列パターンを読むことで、それが示す意味が分かるようになってきた、ということだが、では、その配列パターンとそれが示す意味とを結び付けているものは何なのだろうか？

油の誘電率が酸化によって増加するメカニズムは前述のように考えることができるが、ではそもそも、酸素原子はどうして $-$ に偏る性質を持つのだろうか？もちろん、周期律表で右上の方にあるからだが、ではどうして周期律表で右上の元素は電気陰性度が大きいのか？もちろん、量子力学に基づく原子の電子軌道の計算によって説明はされるのだが、ではそもそも、どうして電子は $-$ の電荷を帯びているのか？……と、突き詰めて行くと、とどのつまりは誰にも説明はできないところに行き付くだろう。

物質の根源を突き詰めて行こうとするのが素粒子物理学だが、クォークやレプトンといった様々な特徴を持つ素粒子に分解してみたところで、では、その素粒子がどうしてその性質を持つのか、ということは誰にも説明できない。また、それらの素粒子の組み合わせで様々な種類の原子、様々な物質ができることになるのだが、では、どうしてその組み合わせによってその物質のその性質が生まれるのか、ということは説明できないだろう。例えば、身近な金属元素で言えば、原子番号26が鉄、原子番号29が銅で、鉄と銅は明らかに性質が異なるが、原子番号の

違いでこれをどう説明できるのだろうか？原子番号が26の元素が“銅”の性質ではなく“鉄”としての性質を持つべき根拠は、どう説明できるのだろうか？

筆者は、学生にコンピュータのプログラミングを教えているが、プログラムを作成する際には、必ずコメントを付けるように、口酸っぱく指導している。コメントとは、プログラムの各部分に、その箇所での処理している内容を説明するために付け加えられた言葉のことである。この変数は何を表しているのか、ここでこの計算をしているのはどういう意味か、などということを言葉で書き込んでおくのである。コメントを記入しながらプログラムを作成すると、頭の中の整理にもなるし、間違いにも気づきやすくなる。コメントを入れておかないと、プログラムの作成中は、いろいろと考えながら記述しているのでよいのだが、しばらく間が空くと、どういう考えでこんな風に記述したのか忘れて分からなくなってしまうことがよくある。場合によっては、自分が作ったプログラムであることすら忘れてしまうことも多い。

各行に適切にコメントが付けられたプログラムでは、理想的には、コメントの部分だけを読むと、それはプログラムの処理の内容を説明する一連の文章になっている。だから、プログラムを作ることは作文と同じだ、と常々学生には言っている。つまり、英数字や数式で記述されたプログラムは、実質的に言葉と等価であり、プログラムの処理の内容は言葉で表現することができる。プログラムは機械語レベルでは0と1の組み合わせだが、0と1の様々な組み合わせパターンに、それぞれの言葉が表す意味が紐づけされているのである。

0と1が様々に組み合わせさせた形自体は、いくつかの0といくつかの1を適当にバラ撒けば、偶然できることもあるだろう。しかし、そうしてできた組み合わせパターンは、単に偶然に並んだ組み合わせであって、それは何かの意味を表すものではない。同じ配列パターンであっても、プログラムを構成する0と1のパターンには、プログラムの作成者の考えた意味が込められている。組み合わせパターンという手段を用いて、作成者の意図した意味が表現されるのである。

ところで、前述のように、DNAの塩基配列パターンには、それぞれそれが表す意味があることが分かっている。陽子26個を含む原子核と26個の電子の組み合わせには、“鉄”という金属の性質を示すという意味が込められている。これは現実である。偶然にできた組み合わせパターンなら、それには意味は無いはずである。もし意味を持っていたら、偶然

にできたことに反する。“偶然”とは、何の理由も因果関係も無しに、ということなのだから。進化論は、この点において矛盾を孕んでいる。

プログラムにはプログラムの作成者が存在するように、意味を持つものにはその意味を与えた主体が存在するはずである。プログラムは、考えて知恵を絞って作成するものであるように、その意味を与えた主体は知性を持つ存在でなければならない。物事の“意味”は、通常、“ことば”で表現されるが、必ずしもいわゆる言語として音声や文字で表現され得ないような“意味”も含めて“ことば”と呼ぶことにしよう。この“ことば”が無ければ、この世界のあらゆる物は、単に原子・分子が適当により集まったものでしかない。

いみじくも、聖書は言う、「初めに、ことばがあった。」と。また、聖書の冒頭には、「初めに、神が天と地を創造した。」とも記されている。日本では、聖書に基づく概念が文化にほとんど浸透していないので、“神”というと、「神ワザ」「神対応」などの言葉にあるように、非常に安っぽいものに聞こえてしまう。しかし、聖書の言う“神”とは“創造主”である。「初めに、ことばがあった。」には、「ことばは神とともにあった。ことばは神であった。」と続く。すなわち、天地創造の神（創造主）が“ことば”そのものであり、全てのものの持つ意味の根源がここにある、ということを宣言している。

DNAの塩基配列パターンが、仮にヒトのDNAの形に並んだとしても、それに“いのち”という“ことば”が吹き込まれなければ、生きた人間は出来上がらない。小惑星探査機はやぶさが持ち帰った試料からアミノ酸が発見されたと聞かす、アミノ酸はあくまで人体を構成する小さなパーツに過ぎない。必要なパーツ（左手系のアミノ酸）を選択して組み合わせる、というプログラム（つまり、ことば）が起動しなければ人体は作られない。そうして人体ができたとしても、それに“いのち”が吹き込まれなければ、単に人体という物体でしかない。

人は誰しも、特に、進化論一辺倒の教育を受けて育ってきた我々日本人の場合はなおのこと、生まれながらの状態では創造主のことが分からない。これを聖書は“罪（原罪）”と指摘する。しかし、天地創造の始めの状態では、「見よ。それは非常に良かった。」と記されている。元々は良かったものが、変化するとすれば、それは悪くなる向きである。油が酸化によって性状が変化する場合、それは“劣化”であるところにこれが現れている。

しかし、人が創造された時、“神のかたち”に造られた、と聖書は言う。すなわち、創造主の知恵が

如何に素晴らしいか、創造主の持つ栄光に満ちた性質を具体的に表すための手段として人が創造されたのだ。現実において明らかに認められる、人と他の動物との決定的な違いが、これで的確に説明される。植物には美しい花を咲かせるものがある。花が咲くのは、そこに虫を誘って集め、受粉の助けをさせるため、という目的もあるだろう。だが、それだけが目的なら、あれほどまでに様々な色彩や模様、様々な形の花びらで装う必要があるだろうか。花を見て美しいと感じることができるのは、我々が“神のかたち”に造られているが故でなくて何であろうか。

筆者には、昔から疑問に思っていることがある。音楽には長調と短調がある。一般に、長調の曲は明るく楽しく、短調の曲は暗く悲しく響く。ところで、長調と短調の違いは、主和音で言えば第3音が半音異なるだけである。この音の組み合わせパターンがわずかに異なるだけで、どうして明るく聞こえたり、暗く聞こえたりするのだろうか。我々人間には、そのそれぞれの音の組み合わせパターンに、そのような感覚を起こさせるようなプログラム（ことば）が紐づけされていることによる、としてしか理解できない。音楽を聴いて感動したり美しさを感じることができるのも、我々が“神のかたち”に造られているが故でなくて何であろうか。

最初は“非常に良かった”私たちが、**“罪”**によって創造主のことが分からなくなってしまった。しかし、そうになってしまうことは、創造主は始めから百も承知であった。私たちには私たちの**“罪”**の償いをする能力が無い。「罪から来る報酬は死です。」と聖書は言う。**“罪”**によって創造主から離れてしまった結果、我々の肉体は時間とともに**“劣化”**し、やがて死に至ることになった。したがって、私たち自身ではこの宿命をどうすることもできない。そこで、創造主はこれを解決するための驚くべき計画を用意しておられた。なんと、ご自身が人の姿をとって地上に生まれ、我々の身代わりとなって死ぬ、という計画である。これが約2000年前に実行に移され、イエス・キリストによって実現した。しかも、その死に方は、十字架という、およそ人にとって最も残酷なものであった。しかし、創造主である以上、その死は死で終わるものではなく、「『わたしはある』という者」として常に今も存在しておられるのだ。

現実にはイエス・キリストを見て、生活をも共にした使徒ヨハネは、福音書に次のように記した。

「神は、実に、そのひとり子をお与えになったほどに、世を愛された。それは、御子を信じる者が、ひ

とりとして滅びることなく、永遠のいのちを持つためである。」

ここに、ひとり子、御子とは、もちろん、イエス・キリストのことである。

また、その手紙の中で次のように記している。

「愛のない者に神はわかりません。なぜなら神は愛だからです。

神はそのひとり子を世に遣わし、その方によって私たちにいのちを得させてくださいました。ここに神の愛が私たちに示されたのです。

私たちが神を愛したのではなく、神が私たちを愛し、私たちの罪のために、なだめの供え物としての御子を遣わされました。ここに愛があるのです。」

すなわち、人が“神のかたち”に造られたのは、“神は愛である”ことを、目に見える形あるものとして具体的に表現するためであったのだ。

もし、神は無い、として進化論を信奉するのならば、油が使えば使うほど時間と共に性状変化し、やがていつかアミノ酸が生まれ、そのうちに生命が誕生する、つまり、“劣化”するのではなく“進化”するのだと信じるとよい。アミノ酸に必要な材料、C、H、そして空気中にはO、Nもあるのだから。しかし、そうして仮に、偶然に生命が生まれたとして、はたしてその生き物は、“愛”という“ことば”を持っているだろうか？

参 考 文 献

- 1) 片山寛：「潤滑油の酸化」, 油化学Vol. 5 (1956), pp. 261-270.
- 2) 古本啓二：「無添加潤滑油の酸化特性」, 日本船用機関学会誌Vol. 19 (1984), pp. 590-596.
- 3) 本田知己：「潤滑油の劣化診断・検査技術」, 精密工学会誌Vol. 75 (2009), pp. 359-362.
- 4) C.T. Dervos, et al. : “A Complex Permittivity Based Sensor for the Electrical Characterization of High-Voltage Transformer Oils”, Sensors Vol. 5 (2005), pp. 302-316.
- 5) A.T. Pérez and M. Hadfield : “Low-Cost Oil Quality Sensor Based on Changes in Complex Permittivity”, Sensors Vol. 11 (2011), pp. 10675-10690.
- 6) L. Su, et al. : “Analytical Method to Estimate the Complex Permittivity of Oil Samples”, Sensors Vol. 18 (2018), pp. 984-995.
- 7) M. Deguchi : “A simple method for detecting very small changes in capacitance or inductance”, Microelectronics Journal 101 (2020), 104802.